

## 基于拓扑序列法的灰色航迹关联方法

张宇, 王国宏, 关成斌, 陈垒  
(海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台 264001)

**摘要:** 为了解决组网雷达存在系统偏差情况下的航迹关联问题,提出了基于拓扑序列法的灰色航迹关联方法。首先,采用灰色理论生成当前时刻目标拓扑序列的灰色关联矩阵,并建立航迹间的相关度量;然后,运用全局最优化方法对相关度量矩阵进行最优化分配获得航迹关联对。该算法采用全局最优化方法避免了门限选择不当对正确关联概率带来的影响,有效地利用了航迹的空间分布信息和状态信息。仿真结果表明,该算法可以有效地实现系统偏差情况下的航迹关联。

**关键词:** 航迹关联; 灰色理论; 空间拓扑; 全局最优; 系统偏差

**中图分类号:** V271.4; TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)09-0001-05

## Gray Track Correlation Algorithm Based on Topology Sequence Method

ZHANG Yu, WANG Guohong, GUAN Chengbin, CHEN Lei

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** To improve the track association with sensor bias between networking radars, a novel gray track correlation algorithm based on topology sequence method is proposed. Firstly, the gray theory is utilized to get the gray correlation matrix of topology sequence, and the correlation measurement between tracks is set up. Then, the correlation measurement matrix is processed by global optimization method to get the association couples. The algorithm makes use of global optimization to avoid the influence on correct probability owing to the improper choice of threshold, and utilizes space distribution and status messages of the tracks effectively. The simulation results show that the track correlation with sensor bias can be achieved more effectively.

**Key words:** track association; gray theory; space topology; global optimization; sensor bias

### 0 引言

航迹关联是雷达组网应用中的核心问题,它需要判断来自不同雷达的航迹是否对应同一个目标。准确的航迹关联能有效地减少虚假、重复的目标,同时提高目标探测精度。通过长期的研究,已经总结出统计相关法和模糊判别法<sup>[1]</sup>两大类算法,如加权法、最近邻域法、K近邻域及修正K近邻域法等基于统计理论的方法。在此基础上,何友等国内学者又提出模糊双门限法、模糊综合函数法、多因素模糊综合决策法等基于模糊模式识别的关联方法<sup>[1-2]</sup>。但是,这些方法<sup>[3-6]</sup>通

常都没有将系统误差的影响考虑在内,仅考虑了随机误差。文献[7]采用灰色关联解决系统偏差下的航迹关联问题,但由于涉及门限选取问题,可能导致漏关联概率大大提升,致使航迹关联的正确概率严重下降;文献[8]提出了目标参照拓扑的航迹关联方法,但该方法受空间划分方式和经验性门限值选择的限制,实际应用中效果并不那么理想;文献[9]对参照拓扑法进行了改进,但建立拓扑序列矩阵时没有考虑目标速度信息,造成有用信息的丢失,致使正确关联概率下降。

针对以上问题,本文在系统偏差情况下提出了基于拓扑序列法的灰色航迹关联方法。首先,采用灰色理论生成当前时刻目标拓扑序列的灰色关联矩阵,并建立航迹间的相关度量;然后,采用最优分配方法对相关度量矩阵进行处理得到航迹关联对。该方法有效地利用了空间信息和目标状态信息,并且关联的过程中无需进行关联门限选择,有效地实现了有系统偏差情

收稿日期:2012-08-29

修回日期:2012-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(61032001);“泰山学者”建设工程专项经费资助项目

作者简介:张宇(1987—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士生,研究方向为误差配准、雷达组网。

况下的航迹关联。

## 1 系统描述

假设有异地配置的两部两坐标雷达  $A$ 、 $B$ ，以雷达  $A$  作为融合中心，并以其所在位置为原点建立公共笛卡尔坐标系，雷达  $B$  的笛卡尔坐标  $(x_B, y_B)$ ，雷达  $A$  真实的量测值为  $(r_A(k), \theta_A(k))$ ，雷达  $A$  的距离、方位角系统偏差值为  $(\Delta r_A, \Delta \theta_A)$ ，雷达  $A$  的随机量测误差为  $(e_{rA}(k), e_{\theta A}(k))$ ；雷达  $B$  真实的量测值为  $(r_B(k), \theta_B(k))$ ，雷达  $B$  的距离、方位角系统偏差为  $(\Delta r_B, \Delta \theta_B)$ ，雷达  $B$  的随机量测噪声为  $(e_{rB}(k), e_{\theta B}(k))$ 。则两部传感器在单目标情况下的误差配准几何关系如图 1 所示。

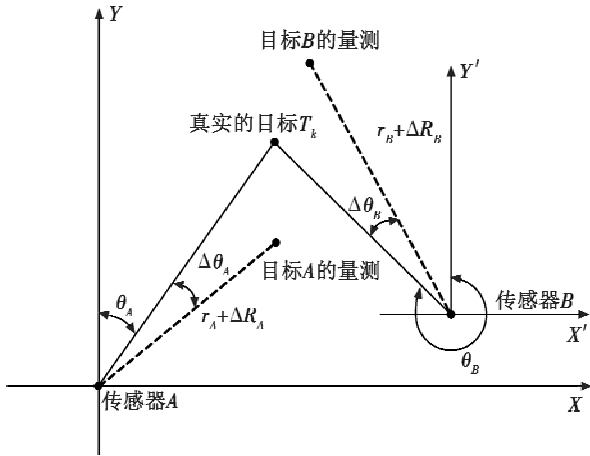


图1 多传感器误差配准的几何关系

Fig. 1 Geometry relation of multi-sensor registration

在有两个传感器的信息融合系统中，假设其公共监视区中有  $N$  个目标，则其中目标  $j$  的状态方程为

$$X_j(k+1) = F(k)X_j(k) + W_j(k), \quad j=1,2,\dots,N \quad (1)$$

式中： $X_j(k)$  表示目标  $j$  在  $k$  时刻的状态信息； $F(k)$  为状态转移矩阵；系统噪声  $W_j(k)$  为零均值的高斯白噪声序列，其协方差为  $E[W_j(k)W_j^T(l)] = Q_j\sigma_M$ 。

目标  $j$  的量测方程为

$$Z_j(k) = h_j(X_j(k)) + V_j(k) \quad (2)$$

式中： $h_j(X_j(k))$  为非线性的量测矩阵； $V_j(k)$  为零均值高斯白噪声序列，其协方差为  $E[V_j(k)V_j^T(l)] = R_j\sigma_M$ 。

局部传感器的航迹滤波和预测利用传统的Kalman滤波技术，通过滤波消除随机噪声对目标航迹的影响，然后将多目标的航迹滤波值送入融合中心，进行目标航迹关联。

## 2 基于拓扑序列的灰色航迹关联算法

多雷达目标航迹关联问题需要考虑各雷达系统偏

差、数据时间对准、观测随机误差等因素的影响。因为系统中各种不同传感器具有不同的采样速率，以及系统中各种传感器固有延迟与通讯延迟的不同，经常遇到传感器异步的情况。由于本文的研究重点在航迹关联的算法层面上，所以假设进行航迹关联的数据已经进行了时间对准。同时，经过滤波已经基本消除了随机噪声对目标航迹的影响。

数据融合中心获得了滤波后的目标航迹，此时可忽略滤波误差的影响，但系统偏差依然存在。经过理论分析，组网传感器的测距系统偏差使得各传感器上报的目标航迹间发生平移，而测方位角系统偏差主要是使得各传感器上报的目标航迹间产生旋转，这就导致滤波后的航迹偏离了目标真实航迹。对于不同的传感器来说，滤波航迹的偏移程度不同，系统偏差越大，造成的偏移程度越大，此时采用传统的滤波方法将无法对目标航迹进行准确的关联。

### 2.1 拓扑序列法描述

经过上文分析，较大的系统偏差会造成雷达探测的局部航迹相对于目标真实航迹发生旋转与平移，而对于同一传感器来说，这种旋转和平移并不能改变局部航迹之间的相对位置关系。基于此，某时刻探测目标之间的位置关系和真实目标之间的位置关系可以认为是相同的，所以，目标之间的拓扑关系可以用于航迹关联。

图 2 所示为某时刻雷达的观测点拓扑序列图，通过状态估计信息可以形成每个目标自己的拓扑序列。假设其中一个传感器的观测点数为  $n$ ，首先对上报航迹点进行编号，则其状态估计向量序列为  $\{\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_n\}$ ，则参考点  $M$  的拓扑序列为  $\{W_{k,M,j}, 1 \leq j \leq n\} = \{G(\hat{X}_M, \hat{X}_1), G(\hat{X}_M, \hat{X}_2), \dots, G(\hat{X}_M, \hat{X}_M), \dots, G(\hat{X}_M, \hat{X}_n)\}$ 。其中： $k$  为关联时刻；函数  $G()$  为采用灰色理论求取拓扑序列的过程。具体过程见 2.2 小节。

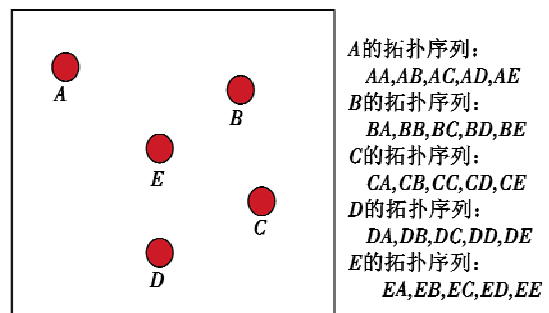


图2 雷达观测点拓扑序列

Fig. 2 Topology sequence of sensor's targets

### 2.2 基于拓扑序列的灰色关联矩阵

目标状态矢量由目标的位置（包括  $x$ 、 $y$  方向）、目标的速度（对应  $x$ 、 $y$  方向的速度）、目标航向以及目标

加速度等特征参数构成<sup>[10]</sup>。与文献[9]不同,由于目标拓扑关系的变化趋势是由目标位置和速度所引起的,并且加速度信息可由速度分量获得,所以本文选取位置和速度分量作为拓扑序列的信息分量。为了讨论问题的方便,假设送至融合中心的所有状态估计 $\hat{X}_s^i(k|k)$ , ( $s=1,2,\dots,M, i=1,2,\dots,n$ )都在相同的坐标系里,并且各传感器同步采样,这里 $M$ 是局部节点数, $n$ 是节点 $s$ 的航迹个数。

假设两传感器的航迹号集合分别为

$$U_A = \{1, 2, \dots, n_A\}, U_B = \{1, 2, \dots, n_B\} \quad (3)$$

式中, $n_A$ 和 $n_B$ 分别为两传感器上报航迹数。

定义 $\hat{X}_A^i(k|k)$ ,  $\hat{X}_B^j(k|k)$ , ( $i \in U_A, j \in U_B$ )分别为 $k$ 时刻经坐标转换后传感器 $A$ 对目标 $i$ 和传感器 $B$ 对目标 $j$ 的状态估计,也即两传感器的第 $i, j$ 条航迹。对同一时刻同一传感器的拓扑序列集生成局部灰色关联矩阵,表示航迹间的相互关系。

对具体的每一个时刻点,各航迹都有相同的状态估计量,为了保证数据具有可比性,在进行灰关联分析时,需要对状态估计向量中的每一分量进行标准化处理。这里采用区间值化的方法对特征指标数据进行标准化处理。因为拓扑序列的时刻相同,所以在处理过程中省略时间变量 $k$ 。

$$\hat{X}_s^j(m) = \frac{\hat{X}_s^j(m) - \min_j(\hat{X}_s^j(m))}{\max_j(\hat{X}_s^j(m)) - \min_j(\hat{X}_s^j(m))} \quad (4)$$

式中: $m=1,2,\dots,l$ ,为状态估计向量中第 $m$ 个性能指标; $j=1,2,\dots,n$ ,为航迹数; $s=A,B$ ,为局部节点。

数据序列标准化完成以后,在同一传感器中,定义航迹 $i$ 和 $j$ 的相关系数序列为

$$\xi_s^{ij}(m) = \frac{\min_k \min_j |\hat{X}_s^i(m) - \hat{X}_s^j(m)| + \rho \max_k \max_j |\hat{X}_s^i(m) - \hat{X}_s^j(m)|}{|\hat{X}_s^i(m) - \hat{X}_s^j(m)| + \rho \max_k \max_j |\hat{X}_s^i(m) - \hat{X}_s^j(m)|} \quad (5)$$

$i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n$

$$\Delta_s^{ij}(m) = |\hat{X}_s^i(m) - \hat{X}_s^j(m)|$$

则

$$\xi_s^{ij}(m) = \frac{\min_k \min_j \Delta_s^{ij}(m) + \rho \max_k \max_j \Delta_s^{ij}(m)}{\Delta_s^{ij}(m) + \rho \max_k \max_j \Delta_s^{ij}(m)} \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为分辨系数, $\rho$ 越小,分辨力越大,一般取 $\rho=0.5$ , $\rho$ 的取值可视具体情况而定; $\min_k \min_j \Delta_s^{ij}(m)$ 称为两级最小差; $\max_k \max_j \Delta_s^{ij}(m)$ 为两级最大差; $\Delta_s^{ij}(m)$ 称为第 $m$ 个指标 $\hat{X}_s^i(m)$ 与 $\hat{X}_s^j(m)$ 的绝对差。式(4)~式(6)为函数 $G(\cdot)$ 的处理过程。

在同一传感器中,每个相关序列的分量表示该航

迹的一个信息分量与其他航迹相同分量之间的相似性,为了将每一比较数列各个指标的信息分量集中在一个值上以便于比较,定义描述两条航迹整体相似度的灰色关联度为

$$\gamma_s^{ij} = \sum_{m=1}^l \alpha(m) \xi_s^{ij}(m) \quad (7)$$

式中, $\alpha(m)$ 为权重因子, $\alpha(m) \geq 0$ 且 $\sum_{m=1}^l \alpha(m) = 1$ 。则利用拓扑信息处理后的灰色关联矩阵为 $G_s = [\gamma_s^{ij}]$ 。

定义两部传感器相似度量

$$d_{ij} = (G_A(i, :) - G_B(j, :))^2 \quad (8)$$

则整体的航迹关联矩阵为 $D = [d_{ij}]$ 。

### 2.3 全局最优分配算法

对航迹关联矩阵进行最优分配<sup>[11-12]</sup>,便可得到 $k$ 时刻的可能航迹关联对,分配原则为:1)矩阵的每一行最多只有一个元素被分配;2)矩阵的每一列最多只有一个元素被分配;3)所有被分配的元素值的总和最小。则两局部节点下的航迹关联问题为

$$\min \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_B} D(i, j) a(i, j) \quad (9)$$

s. t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n_B} a(i, j) = 1, & i = 1, 2, \dots, n_A \\ \sum_{i=1}^{n_A} a(i, j) = 1, & j = 1, 2, \dots, n_B \end{cases}$$

式中: $a(i, j) = 1$ 或 $0, i = 1, 2, \dots, n_A, j = 1, 2, \dots, n_B$ ; $a(i, j) = 1$ ,表明节点1的航迹 $i$ 和节点2的航迹 $j$ 关联成功; $a(i, j) = 0$ ,表示不关联。

### 3 航迹质量管理

为了控制航迹关联检验的完结与终止,可进一步引入航迹关联质量,选取正整数 $I$ 和 $R, \forall k = 1, 2, \dots, R$ ,若航迹 $i, j$ 试验关联成功,则设定航迹关联质量 $m_{ij}(k) = m_{ij}(k-1) + 1, (m_{ij}(0) = 0)$ ,否则 $m_{ij}(k) = m_{ij}(k-1) - 1$ 。若在 $R$ 次对准关联检验后有 $m_{ij}(R) \geq I$ ,则认为航迹 $i$ 与 $j$ 形成固定对准关联,并停止对它们间的后续对准关联检验,即对准关联赋值进入固定期。而若 $\exists i' \in U_A$ 对任意与它可能关联的 $j'(j' \in U_B)$ 均有 $m_{i'j'}(R) < I$ ,则认为 $i', j'$ 不能形成固定对准关联对,需要进入下一个时刻的关联检验。

为评价航迹关联效果考虑3类概率:第一类为正确关联概率 $E_c$ ,即正确关联来自两部雷达相同目标的概率;第二类为错误关联概率 $E_e$ ,即把来自不同目标的两条航迹判为关联的概率;第三类为漏关联概率 $E_s$ ,表示航迹 $i(i \in n_A)$ 和航迹 $j(j \in n_B)$ 本来是来自同

一个目标,但关联检验判决航迹没有关联对,即航迹  $i$  漏关联了。两传感器能够同时观测到的航迹数为  $N$ , 令  $N_c$  为正确关联航迹数,  $N_e$  为错误关联航迹数,  $N_s$  为漏关联航迹数。于是有

$$N_c + N_e + N_s = N \quad (10)$$

$$E_c = \frac{N_c}{N}, E_e = \frac{N_e}{N}, E_s = \frac{N_s}{N} \quad (11)$$

$$E_c + E_e + E_s = 1 \quad (12)$$

#### 4 仿真结果分析

对本文提出的仿真方法进行比较和验证,设置如下所述仿真环境。

雷达  $A$  和雷达  $B$  的地理坐标分别为  $(0 \text{ km}, 0 \text{ km})$  和  $(30 \text{ km}, 0 \text{ km})$ 。雷达的距离量测误差均方根误差为  $100 \text{ m}$ ;方位角和俯仰角量测误差均方根误差为  $0.5^\circ$ ;  $x$  方向起始位置  $-30000 \sim 20000 \text{ m}$  均匀产生,  $y$  方向起始位置  $-30000 \sim 20000 \text{ m}$  均匀产生,速度  $200 \text{ m/s}$ ,速度方向  $0 \sim 2\pi$  均匀产生。雷达的扫描周期均为  $5 \text{ s}$ ,仿真  $20$  个扫描周期,蒙特卡罗仿真次数为  $50$  次。I/R 逻辑选择  $6/8$  规则。

仿真场景一:雷达  $A$  的系统误差为  $1000 \text{ m}, 2^\circ$ ;雷达  $B$  的系统误差为  $-1000 \text{ m}, -2^\circ$ ;传感器  $A$  和  $B$  同时检测到  $60$  个目标,两批编队飞行目标,每批含  $10$  个目标,目标间距  $2 \text{ km}$ ,杂散目标  $40$  个。具体关联概率曲线如图 3 ~ 图 5 所示。

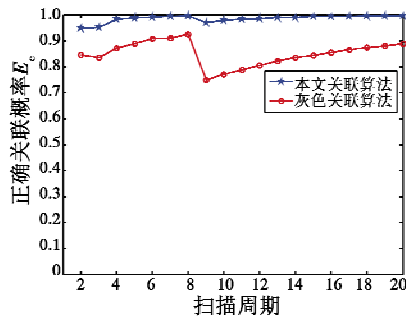


图 3 正确关联概率曲线

Fig. 3 Curve of correct correlation probability

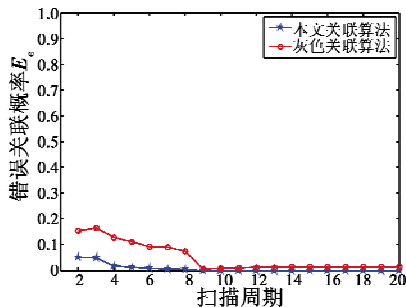


图 4 错误关联概率曲线

Fig. 4 Curve of false correlation probability

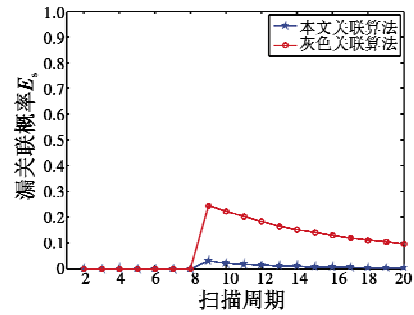


图 5 漏关联概率曲线

Fig. 5 Curve of miss correlation probability

仿真场景二:模拟密集目标航迹关联,雷达  $A$  的系统误差为  $1000 \text{ m}, 2^\circ$ ;雷达  $B$  的系统误差为  $-1000 \text{ m}, -2^\circ$ ;传感器  $A$  和  $B$  同时检测到  $100$  个目标,两批编队飞行目标,每批含  $20$  个目标,目标间距  $2 \text{ km}$ ,杂散目标  $60$  个。具体关联概率曲线如图 6 ~ 图 8 所示。

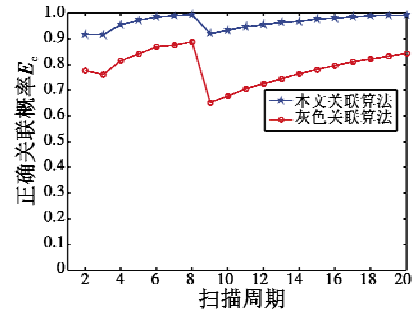


图 6 正确关联概率曲线

Fig. 6 Curve of correct correlation probability

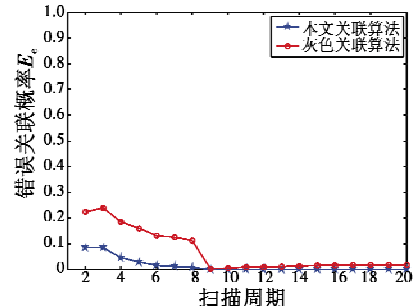


图 7 错误关联概率曲线

Fig. 7 Curve of false correlation probability

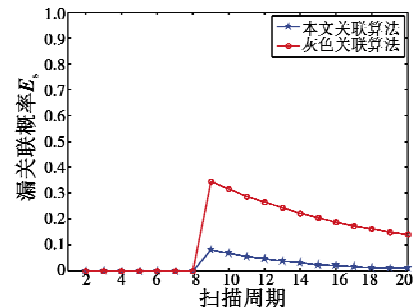


图 8 漏关联概率曲线

Fig. 8 Curve of miss correlation probability

由图 3 ~ 图 8 可以看出,本文所提出的航迹关联算法与灰色关联算法相比,正确关联率明显提高。在

第8步时关联概率曲线发生波动,是由航迹质量管理过程引起的,前8个时刻仅是对单步关联概率进行仿真,从第8步开始判断航迹关联质量,致使关联概率波动性变化。通过两个仿真环境的对比,本文算法的正确关联概率不随目标数目增多而明显变差,具有较强的鲁棒性。因此可以有效进行系统偏差下的航迹关联,对处理密集目标环境航迹关联问题仍有较好的互联性能。

## 5 结论

本文提出了一种基于拓扑序列法的灰色关联算法。该算法充分利用目标拓扑信息,以各部雷达不同航迹的状态向量建立局部灰色航迹关联矩阵,再利用不同传感器的关联矩阵建立相似度量矩阵,最后采用最优化方法进行求解,得出全局最优的航迹关联对。仿真结果表明,在不同的仿真条件下,该算法关联的正确概率变化不大,可以有效地进行复杂环境下的航迹关联。

### 参考文献

- [1] 何友,王国宏,关欣. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社,2010.
- [2] 杨哲,韩崇昭,李晨,等. 基于目标之间拓扑信息的数据关联方法[J]. 系统仿真学报,2008,20(9):2357-2360.
- [3] 何友,彭应宁,陆大铨,等. 分布式多传感器数据融合中的双门限航迹相关算法[J]. 电子科学学刊,1997,19(6):721-728.
- [4] 何友,彭应宁,陆大铨. 多目标多传感器模糊双门限航迹相关算法[J]. 电子学报,1998,26(3):15-18,9.
- [5] HERMAN S M, POORE A B. Nonlinear least-squares estimation for sensor and navigation biases[J]. Signal and Data Processing of Small Targets, SPIE 2006, 6236(1):1-17.
- [6] 衣晓,关欣,何友. 分布式多目标跟踪系统的灰色航迹关联模型[J]. 信号处理,2005,21(6):653-655,662.
- [7] 方亮. 系统偏差条件下的航迹相关技术研究[D]. 湖南:国防科技大学,2009.
- [8] 石玥,王钺,王树刚,等. 基于目标参照拓扑的模糊航迹关联方法[J]. 国防科技大学学报,2006,28(4):105-109.
- [9] 吴泽民,任姝婕,刘熹. 基于拓扑序列法的航迹关联算法[J]. 航空学报,2009,30(10):1937-1942.
- [10] PAN Qinghua, ZHANG Hongjun, WANG Fengshan. Grey association degree analyses and arrangement of targets' value[C]//IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, 2007:238-242.
- [11] 熊伟,张晶炜,何友. 基于多维分配和灰色理论的航迹关联算法[J]. 电子与信息学报,2010,32(4):898-901.
- [12] 肖文凯,肖圣龙,林华,等. 基于匈牙利求解的航迹关联算法研究[J]. 舰船电子工程,2008,28(10):132-135.

## 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。